



# J-PARC におけるドレル・ヤン実験計画

---

澤田 崇広

中央研究院 物理研究所 (台湾)

第7回 高エネルギーQCD・核子構造 勉強会  
東京工業大学 大岡山キャンパス  
2015年12月11日



---

# 概要

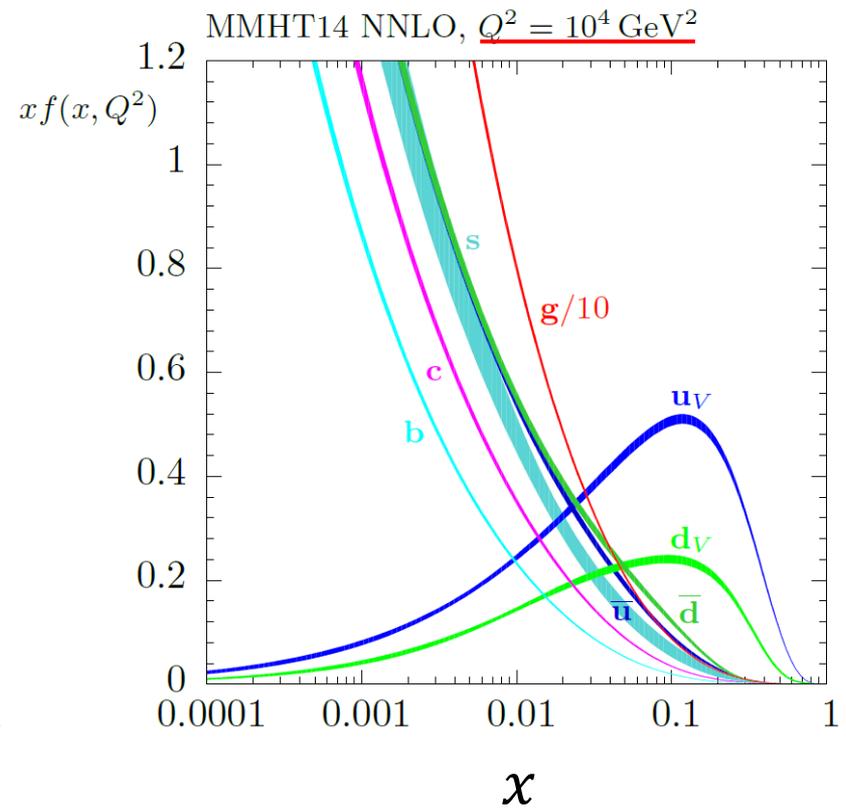
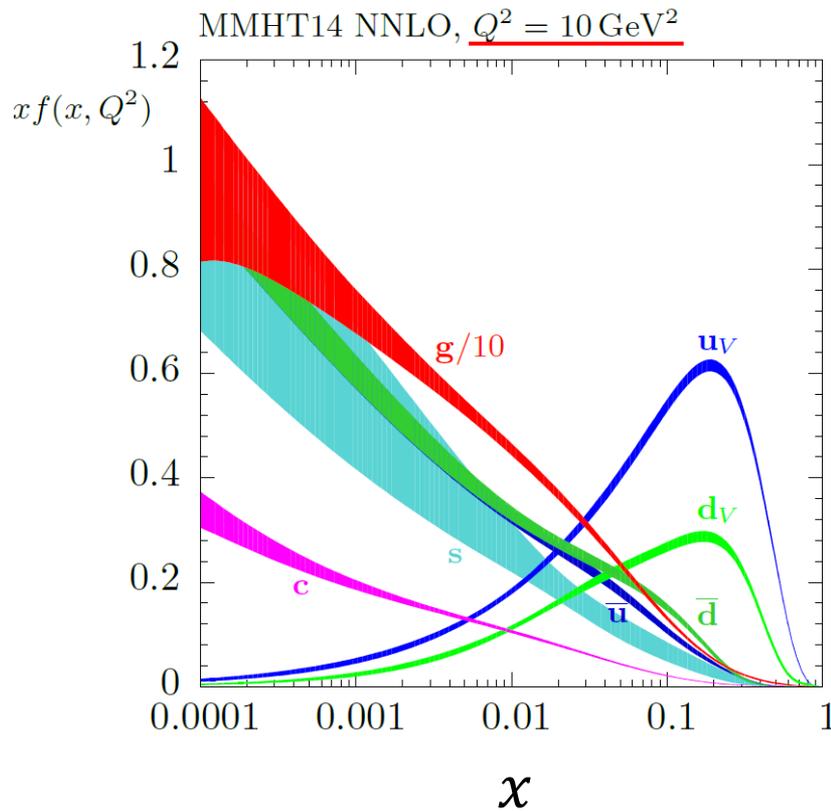
- パarton分布関数 (PDF)
  - 空間的過程 (深非弾性散乱)
  - 時間的過程 (ドレル・ヤン)
- 一般化パarton分布関数 (GPD)
  - 空間的過程 (仮想光子によるコンプトン散乱、仮想光子による中間子生成)
  - 時間的過程 (中間子による排他的ドレル・ヤン)
- J-PARC における、エクスクルーシヴ (排他的) (ドレル・ヤン実験の実現可能性)
- まとめ

# パートン分布関数

## Parton Distribution Function (PDF)

### MMHT 2014 PDFs

*L. A. Harland-Lang, A. D. Martin, P. Motylinski, R.S. Thorne, arXiv:1412.3989*

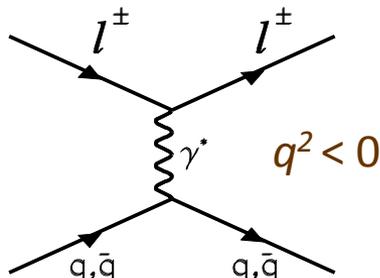


Bjorken  $x$  : パートンの縦運動量割合

# PDF抽出における、空間的過程・時間的過程の相補性

## 深非弾性散乱過程

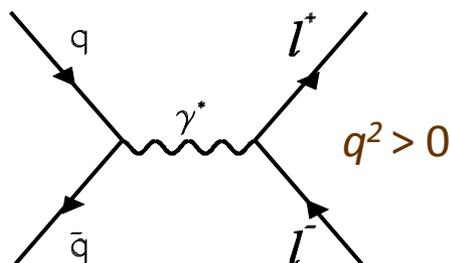
Deep Inelastic Scattering (DIS)



空間的 (Space-like)

## ドレル・ヤン過程

Drell-Yan process (DY)



時間的 (Time-like)

## グローバルPDF解析 に用いられる主な物理過程

Process	Subprocess	Partons	x range
$\ell^\pm\{p, n\} \rightarrow \ell^\pm X$	$\gamma^* q \rightarrow q$	$q, \bar{q}, g$	$x \gtrsim 0.01$
$\ell^\pm n/p \rightarrow \ell^\pm X$	$\gamma^* d/u \rightarrow d/u$	$d/u$	$x \gtrsim 0.01$
$pp \rightarrow \mu^+ \mu^- X$	$u\bar{u}, d\bar{d} \rightarrow \gamma^*$	$\bar{q}$	$0.015 \lesssim x \lesssim 0.35$
$pn/pp \rightarrow \mu^+ \mu^- X$	$(u\bar{d})/(u\bar{u}) \rightarrow \gamma^*$	$\bar{d}/\bar{u}$	$0.015 \lesssim x \lesssim 0.35$
$\nu(\bar{\nu})N \rightarrow \mu^-(\mu^+)X$	$W^* q \rightarrow q'$	$q, \bar{q}$	$0.01 \lesssim x \lesssim 0.5$
$\nu N \rightarrow \mu^- \mu^+ X$	$W^* s \rightarrow c$	$s$	$0.01 \lesssim x \lesssim 0.2$
$\bar{\nu} N \rightarrow \mu^+ \mu^- X$	$W^* \bar{s} \rightarrow \bar{c}$	$\bar{s}$	$0.01 \lesssim x \lesssim 0.2$
$e^\pm p \rightarrow e^\pm X$	$\gamma^* q \rightarrow q$	$g, q, \bar{q}$	$0.0001 \lesssim x \lesssim 0.1$
$e^+ p \rightarrow \bar{\nu} X$	$W^+ \{d, s\} \rightarrow \{u, c\}$	$d, s$	$x \gtrsim 0.01$
$e^\pm p \rightarrow e^\pm c\bar{c} X$	$\gamma^* c \rightarrow c, \gamma^* g \rightarrow c\bar{c}$	$c, g$	$0.0001 \lesssim x \lesssim 0.01$
$e^\pm p \rightarrow \text{jet} + X$	$\gamma^* g \rightarrow q\bar{q}$	$g$	$0.01 \lesssim x \lesssim 0.1$
$p\bar{p} \rightarrow \text{jet} + X$	$gg, qg, q\bar{q} \rightarrow 2j$	$g, q$	$0.01 \lesssim x \lesssim 0.5$
$p\bar{p} \rightarrow (W^\pm \rightarrow \ell^\pm \nu) X$	$ud \rightarrow W, u\bar{d} \rightarrow W$	$u, d, \bar{u}, \bar{d}$	$x \gtrsim 0.05$
$p\bar{p} \rightarrow (Z \rightarrow \ell^+ \ell^-) X$	$uu, dd \rightarrow Z$	$d$	$x \gtrsim 0.05$

DIS

DY

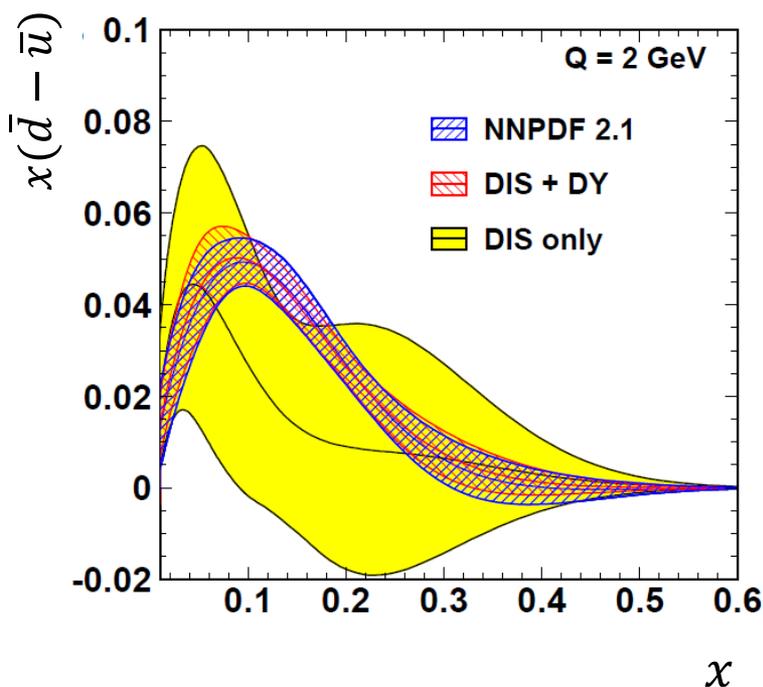
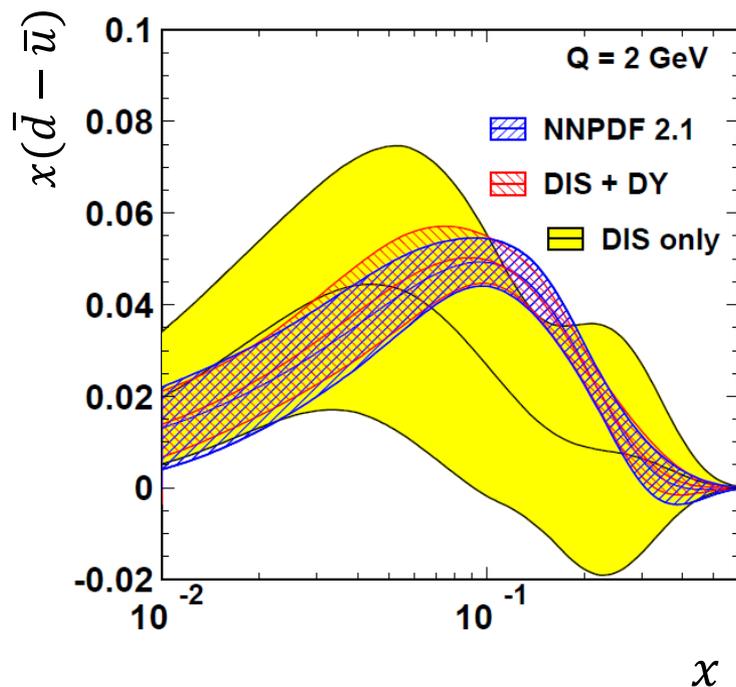
DIS

*Eur. Phys. J. C (2009) 63: 189–285*

DIS過程・DY過程のどちらも、クォーク・反クォークのハドロン内構造 (因子化、普遍性)を調べるのに有益な手段である

# PDF抽出における、空間的過程・時間的過程の相補性

## Constraint of $x(\bar{d} - \bar{u})$ in Global Analysis



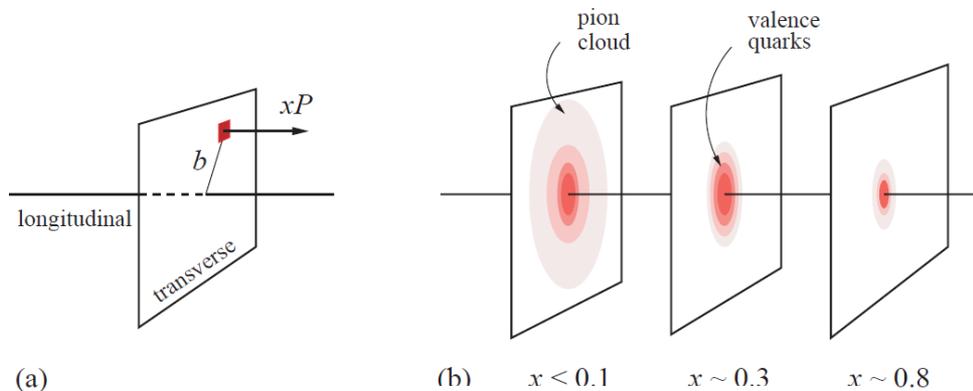
*E. Perez and E. Rizvib, arXiv:1208.1178*

DIS過程・DY過程のどちらも、クォーク・反クォークのハドロン内構造 (因子化、普遍性)を調べるのに有益な手段である

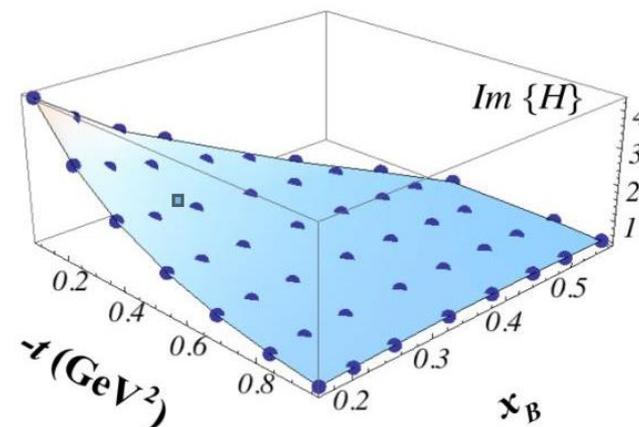
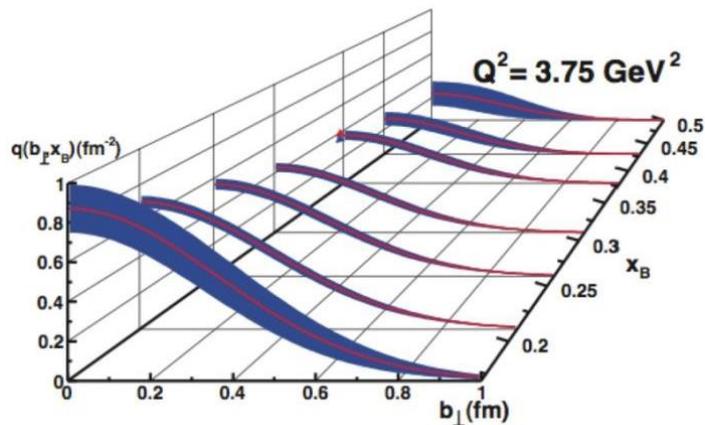
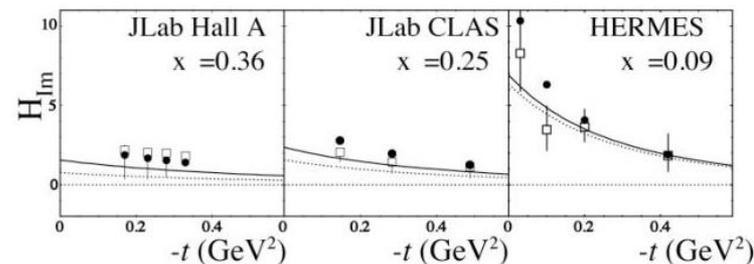


# 一般化パートン分布関数 Generalized Parton Distribution (GPD)

## 空間的断層写真



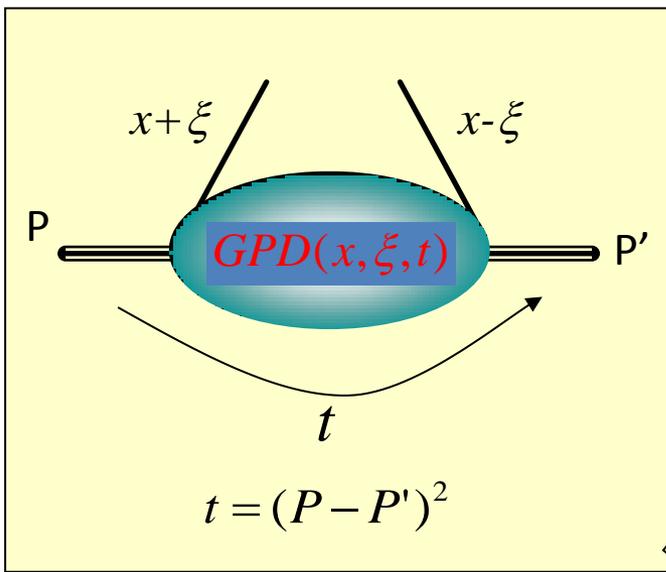
JLAB12 CDR. arXiv:1208.1244



- 核子構造の 1+2次元描像
- 縦運動量と transverse 方向の位置 との相関
- クォーク軌道角運動量とのつながり

# 一般化パートン分布関数

## Generalized Parton Distribution (GPD)



$t = \xi = 0$

$$H_f(x, 0, 0) = q_f(x) = -\bar{q}_f(-x)$$

$$\tilde{H}_f(x, 0, 0) = \Delta q_f(x) = -\Delta \bar{q}_f(-x)$$

1次のモーメント

$$\int_{-1}^1 dx \sum_f H_f(x, \xi, t) = F_1(-t)$$

$$\int_{-1}^1 dx \sum_f E_f(x, \xi, t) = F_2(-t)$$

$$\int_{-1}^1 dx \sum_f \tilde{H}_f(x, \xi, t) = G_A(-t)$$

$$\int_{-1}^1 dx \sum_f \tilde{E}_f(x, \xi, t) = G_P(-t)$$

2次のモーメント

	$\gamma^\mu$	$\gamma^\mu \gamma^5$
no spin flip	$H_f(x, \xi, t)$	$\tilde{H}_f(x, \xi, t)$
spin flip	$E_f(x, \xi, t)$	$\tilde{E}_f(x, \xi, t)$

**Ji's 和則**

$$J_f = \frac{1}{2} \Delta \Sigma^f + L^f = \frac{1}{2} \int_{-1}^1 x dx [H_f(x, \xi, 0) + E_f(x, \xi, 0)]$$

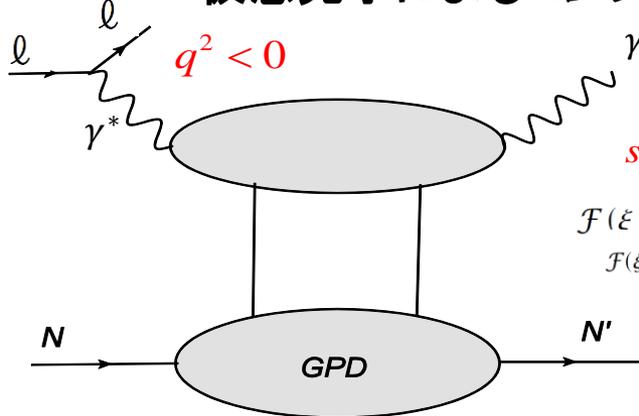
クォーク軌道角運動量を知ることができる

# GPD抽出における、空間的過程・時間的過程の相補性

Muller et al., PRD 86 031502(R) (2012)

## Deeply Virtual Compton Scattering (DVCS)

仮想光子によるコンプトン散乱



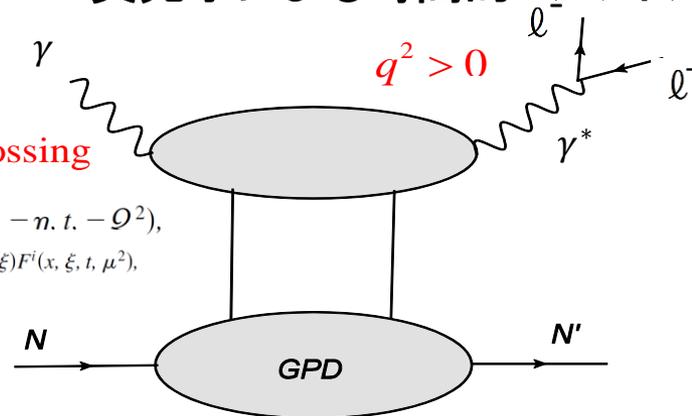
$s \leftrightarrow u$  channel crossing

$$\mathcal{F}(\xi = n.t, \mathcal{Q}^2) \stackrel{\text{SL} \leftrightarrow \text{TL}}{\Rightarrow} \mathcal{F}(\xi = -n.t, -\mathcal{Q}^2),$$

$$\mathcal{F}(\xi, t, Q^2) = \int_{-1}^1 dx \sum_{i=u,d,\dots,g} S^T i(x, \xi) F^i(x, \xi, t, \mu^2).$$

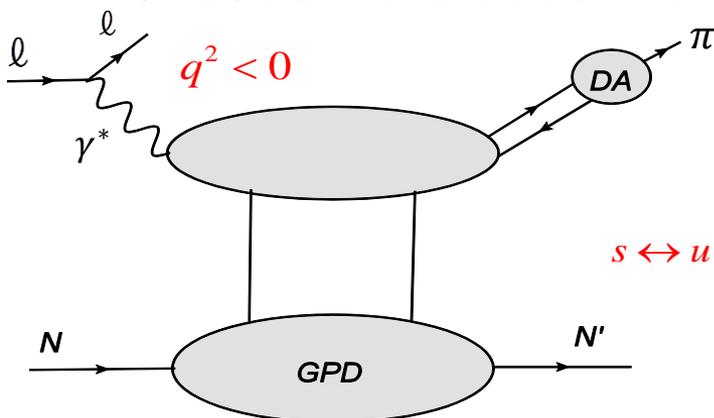
## Time-like Compton Scattering (TCS)

実光子による時間的コンプトン散乱



## Deeply Virtual Meson Production (DVMP)

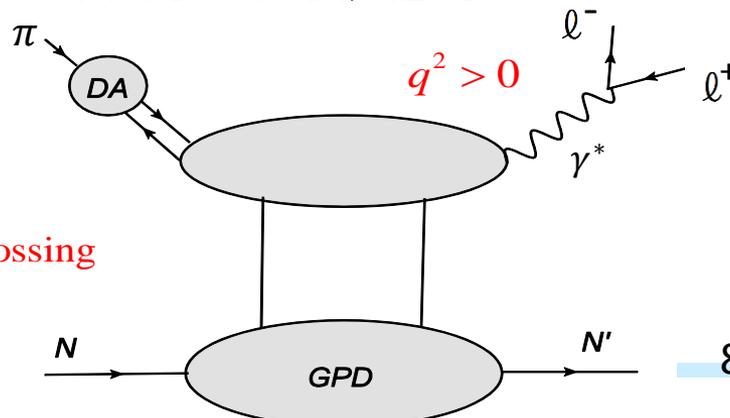
仮想光子による中間子生成過程



$s \leftrightarrow u$  channel crossing

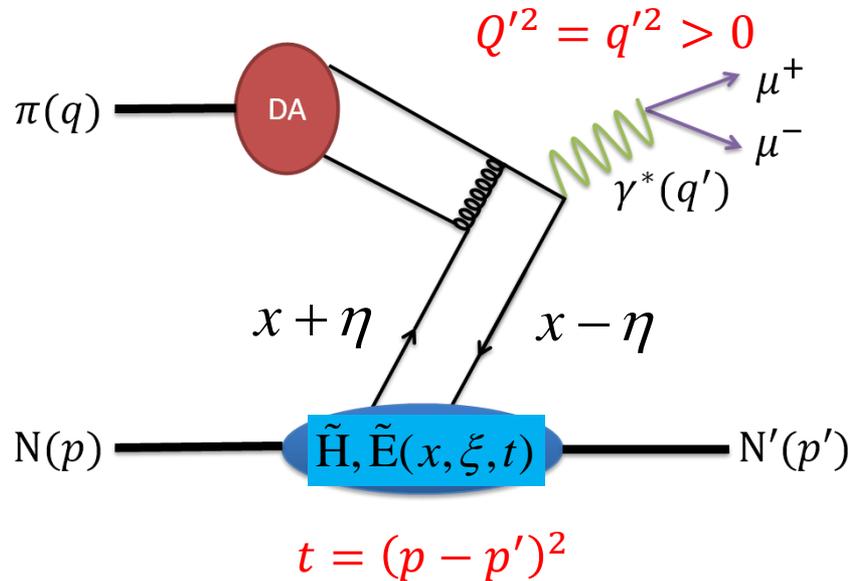
## Exclusive meson-induced DY

中間子による排他的ドレル・ヤン過程



# パイ中間子によるエクスクルーシヴ(排他的) ドレル・ヤン過程 $\pi^- N \rightarrow \mu^+ \mu^- N'$

*E.R. Berger, M. Diehl, B. Pire, PLB 523 (2001) 265*



$$\tau = \frac{Q'^2}{2pq} \approx \frac{Q'^2}{s - M_N^2} = x_B \quad \eta = \frac{(p - p')^+}{(p + p')^+} = \frac{\tau}{2 - \tau}$$

$$\frac{d\sigma}{dQ'^2 dt d(\cos\theta) d\varphi} = \frac{\alpha_{em}}{256\pi^3} \frac{\tau^2}{Q'^6} \sum_{\lambda', \lambda} |M^{0\lambda', \lambda}|^2 \sin^2 \theta,$$

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{dQ'^2 dt} (\pi^- p \rightarrow \gamma^* n) &= \frac{4\pi\alpha_{em}^2}{27} \frac{\tau^2}{Q'^8} f_\pi^2 \\ &\times \left[ (1 - \eta^2) |\tilde{\mathcal{H}}^{du}|^2 - 2\eta^2 \text{Re}(\tilde{\mathcal{H}}^{du*} \tilde{\mathcal{E}}^{du}) - \eta^2 \frac{t}{4M^2} |\tilde{\mathcal{E}}^{du}|^2 \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M^{0\lambda', \lambda} (\pi^- p \rightarrow \gamma^* n) &= -ie \frac{4\pi f_\pi}{3} \frac{1}{Q' (p + p')^+} \bar{u}(p', \lambda') \\ &\times \left[ \gamma^+ \gamma_5 \tilde{\mathcal{H}}^{du}(-\eta, \eta, t) + \gamma_5 \frac{(p' - p)^+}{2M} \tilde{\mathcal{E}}^{du}(-\eta, \eta, t) \right] u(p, \lambda). \end{aligned}$$

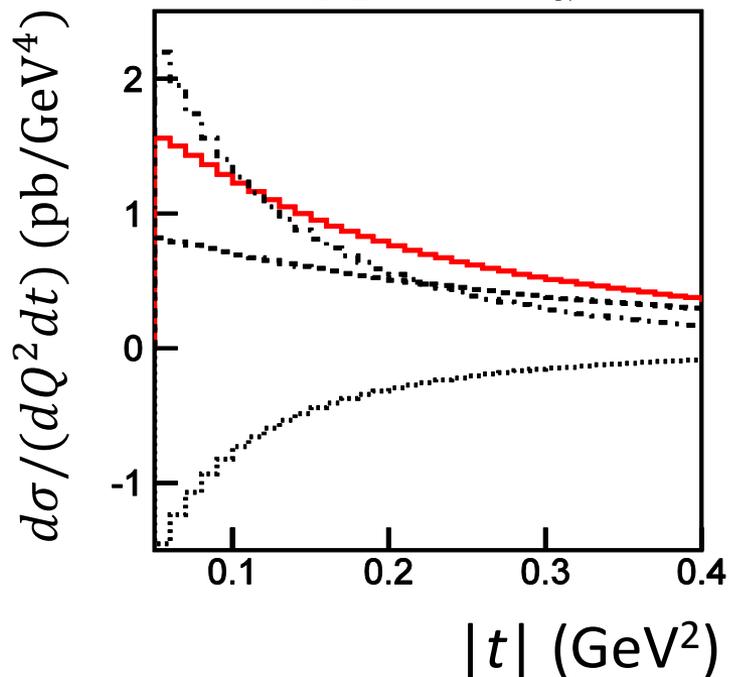
$$\begin{aligned} \tilde{\mathcal{H}}^{du}(\xi, \eta, t) &= \frac{8}{3} \alpha_S \int_{-1}^1 dz \frac{\phi_\pi(z)}{1 - z^2} \\ &\times \int_{-1}^1 dx \left[ \frac{e_d}{\xi - x - i\epsilon} - \frac{e_u}{\xi + x - i\epsilon} \right] \\ &\times [\tilde{H}^d(x, \eta, t) - \tilde{H}^u(x, \eta, t)], \end{aligned}$$

# 微分断面積 ( $Q^2, t, \tau$ )

*E.R. Berger, M. Diehl, B. Pire, PLB 523 (2001) 265*

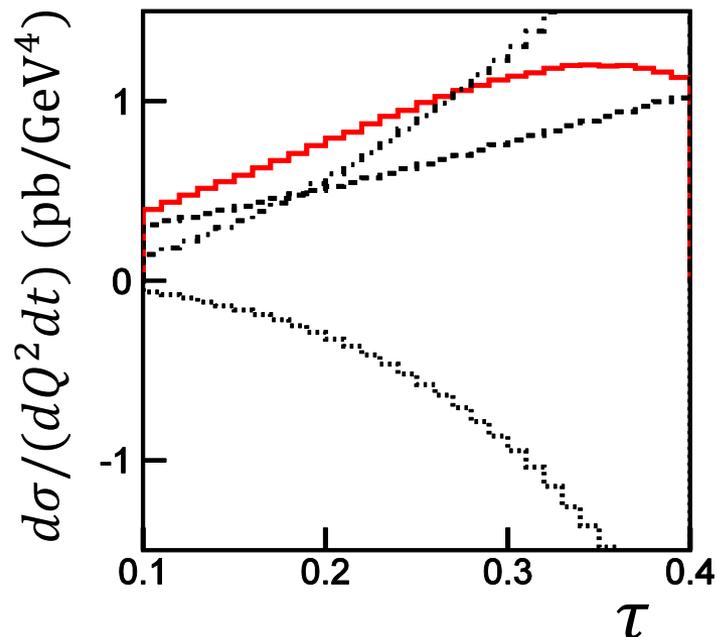
$$Q'^2 = q'^2 = 5 \text{ GeV}^2$$

at  $\tau = \frac{Q'^2}{2pq} \approx \frac{Q'^2}{s - M_N^2} = 0.2$



前方生成が支配的である

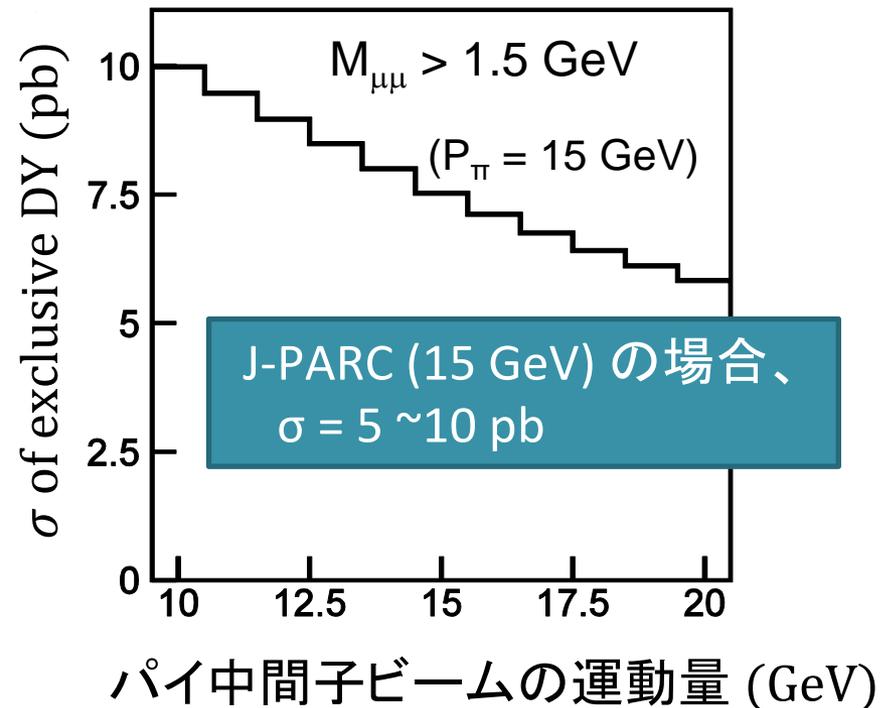
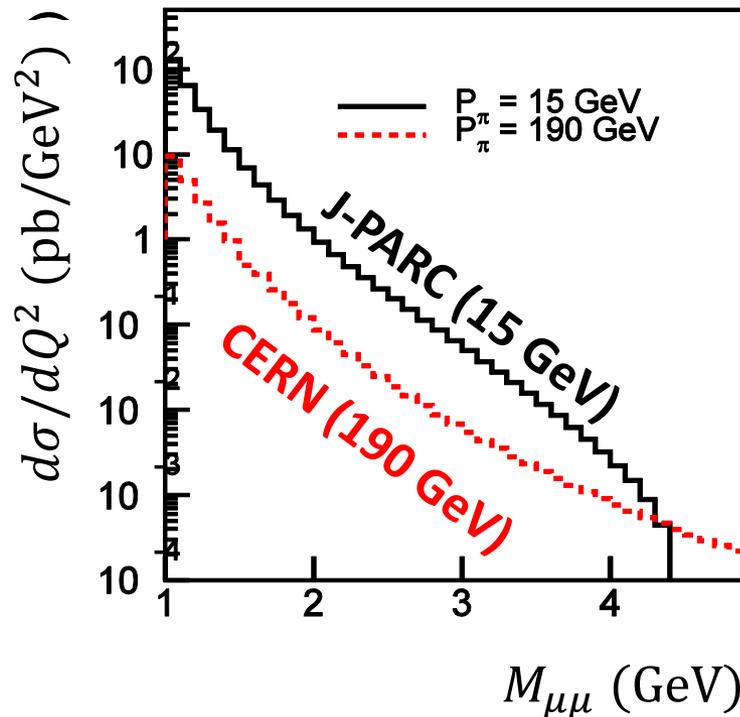
at  $t = (p - p')^2 = -0.2 \text{ GeV}^2$



$s$  が小さくなる (ビームエネルギーが低くなる) にしたがって、生成断面積が増大する

# CERN (190 GeV) vs. J-PARC (15 GeV)

*E.R. Berger, M. Diehl, B. Pire, PLB 523 (2001) 265*



一方、CERN (190 GeV)の場合、 $\sigma = 0.65$  pb

エクスクルーシブDY過程を測定するなら  
低い運動量のビームを扱うFacilityの方が生成量が多く有利

# J-PARC Facility (KEK/JAEA)

South to North

Experimental  
Areas

Linac

3 GeV  
Synchrotron

Neutrino Beams  
(to Kamioka)

Materials and Life  
Experimental Facility

50 GeV Synchrotron

Hadron Exp.  
Facility

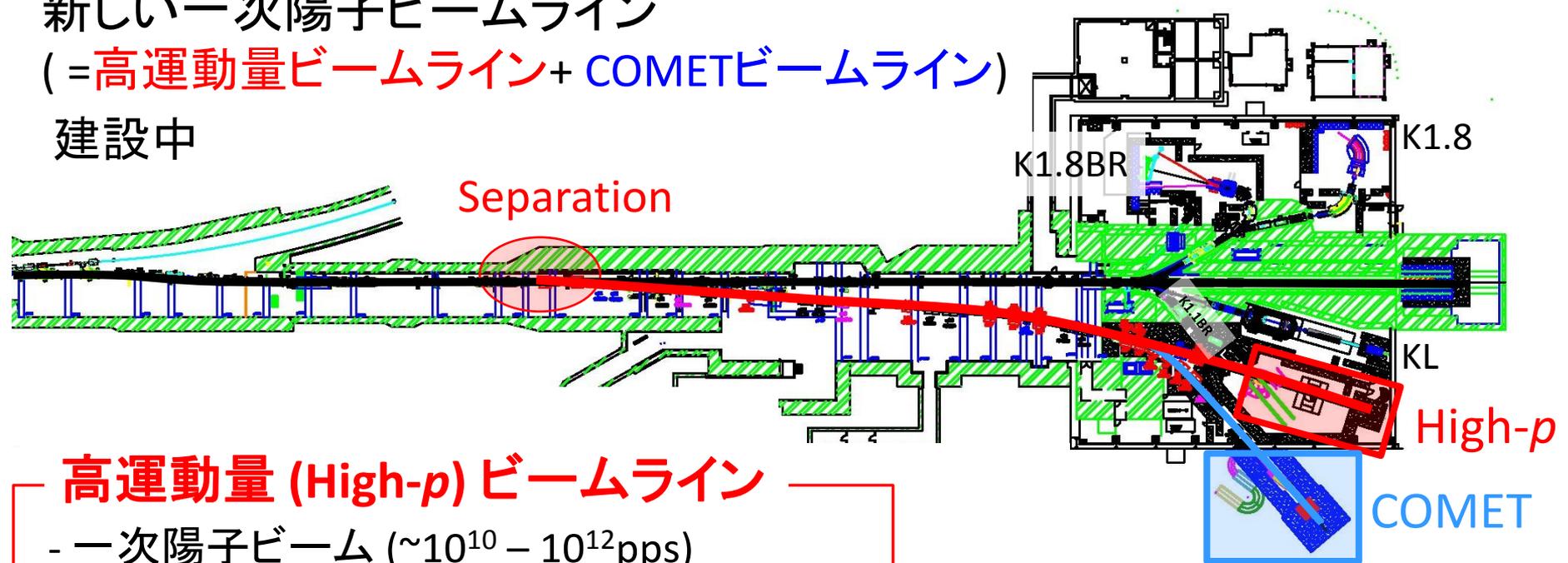
- JFY2007 Beams
- JFY2008 Beams
- JFY2009 Beams

Bird's eye photo in January of 2008

# 新しい一次陽子ビームライン

新しい一次陽子ビームライン  
(=高運動量ビームライン+ COMETビームライン)

建設中



## 高運動量 (High-p) ビームライン

- 一次陽子ビーム ( $\sim 10^{10} - 10^{12}$ pps)  
E16 ( $\phi$ 中間子) 実験
- Unseparated 2次粒子ビーム ( $\pi, K, \bar{p}$ )  
E50 (Charmed Baryon) 実験  
ドレル・ヤン実験(?)

## COMETビームライン

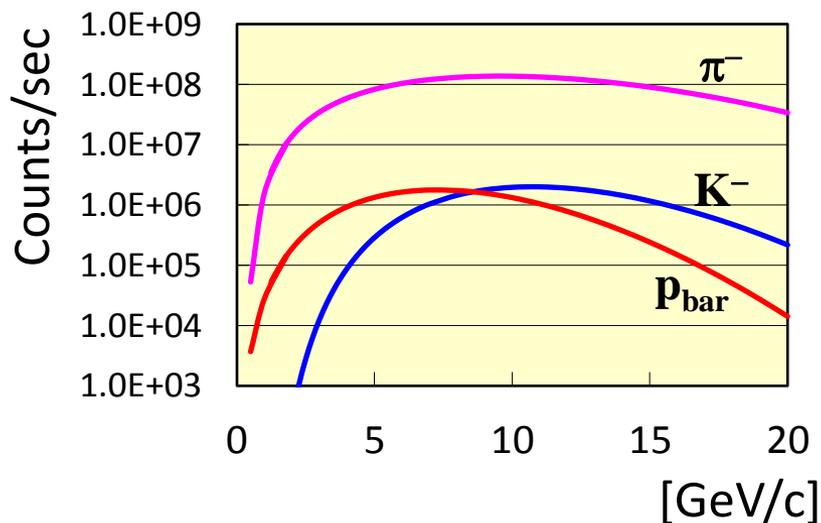
- Search for  $m$  to  $e$  conversion
- 8 GeV, 50 kW protons
- Branch from the high-momentum BL
- Annex building is being built at the south side.

# J-PARC High-momentum BL

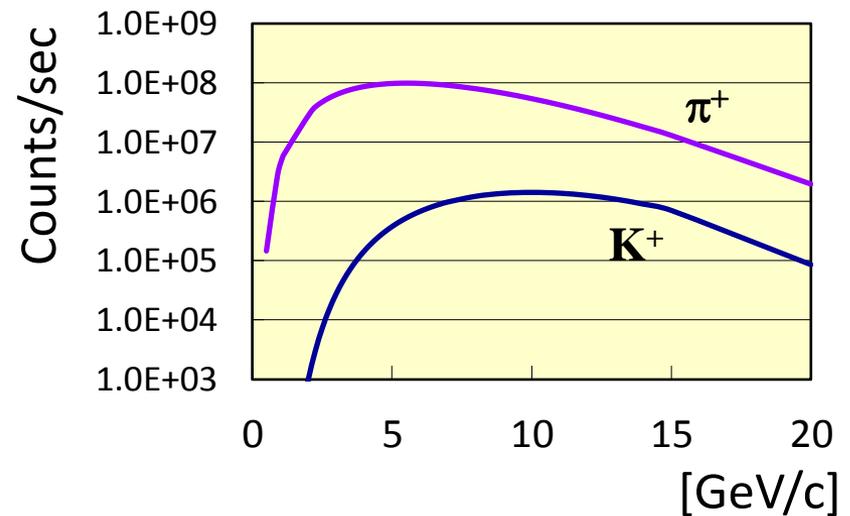
## Unseparated 2次粒子ビーム

- 高強度
- 高分解能:  $\Delta p/p \sim 0.1\%$

負電荷のハドロン・ビーム  
(Prod. Angle = 0 deg.)



正電荷のハドロン・ビーム  
(Prod. Angle = 3.1 deg.)



\* Sanford-Wang: 15 kW Loss on Pt, Acceptance :1.5 msr%, 133.2 m

# インクルーシヴ(包括的)ドリル・ヤン実験の 典型的セットアップ

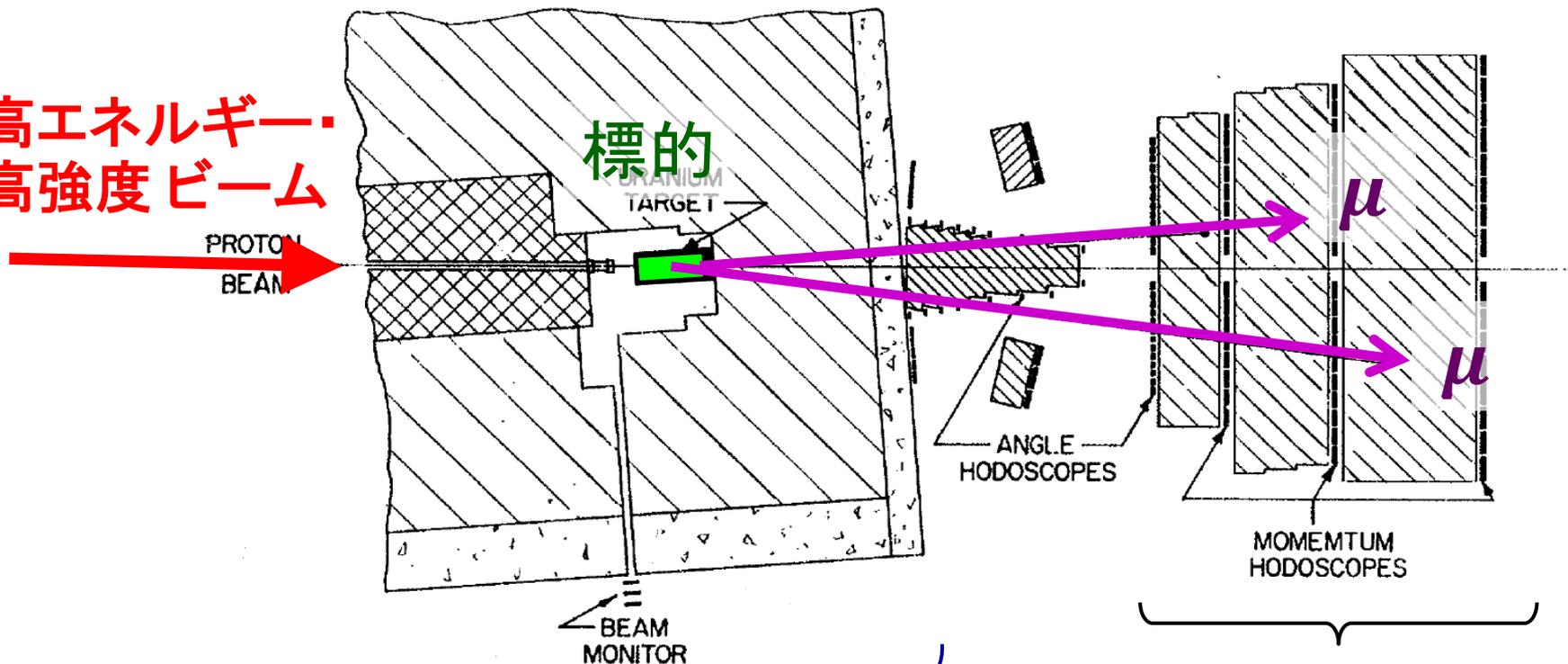
~最初期~

at AGS

*J.H. Christenson et al., PRL 25 (1970) 1523*

$$p U \rightarrow \mu^+ \mu^- X$$

高エネルギー・  
高強度ビーム



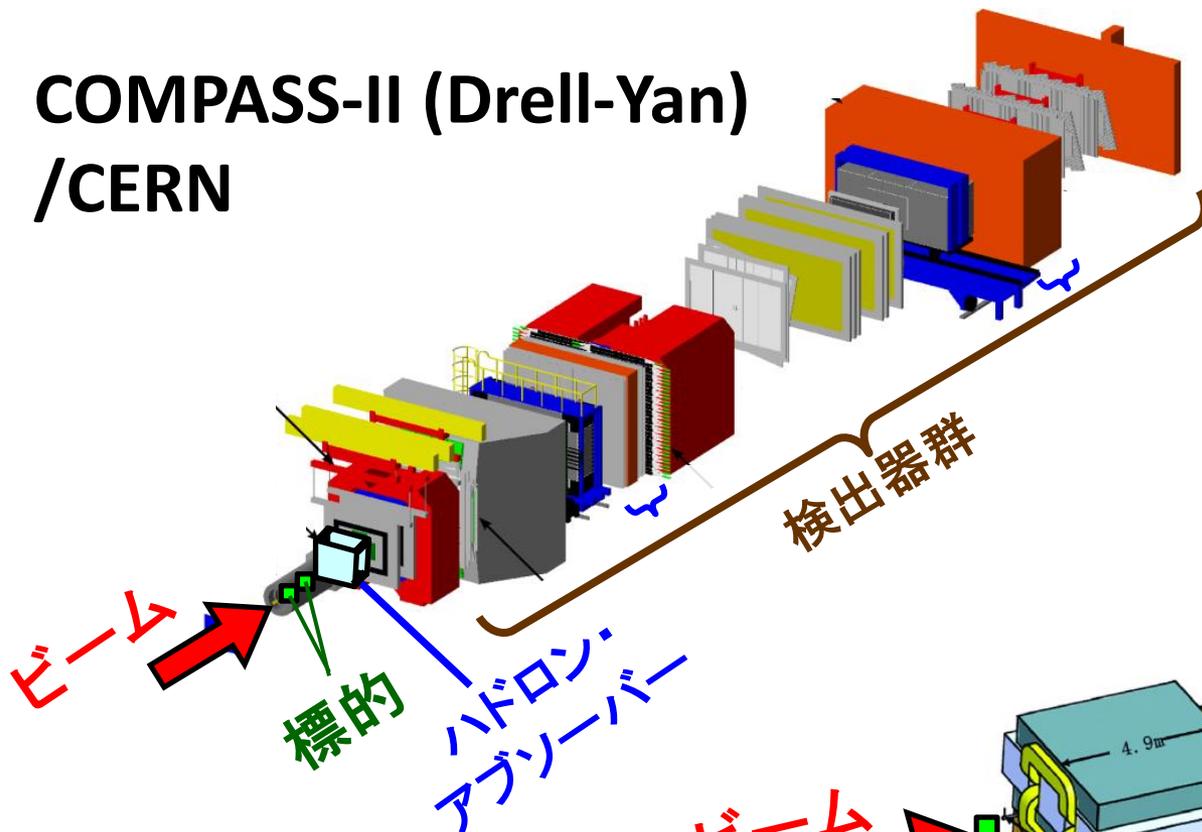
ハドロン・  
アブソーバー

検出器  
(運動量測定)

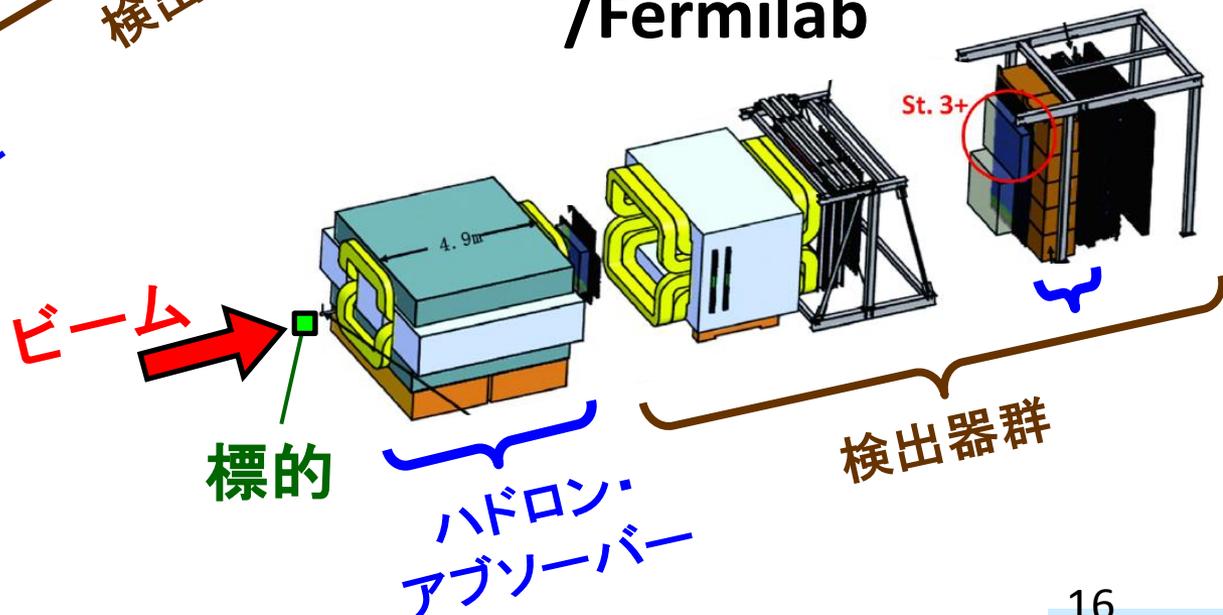
# 包括的(インクルーシヴ)ドリル・ヤン実験の 典型的セットアップ

~ 最近 ~

COMPASS-II (Drell-Yan)  
/CERN

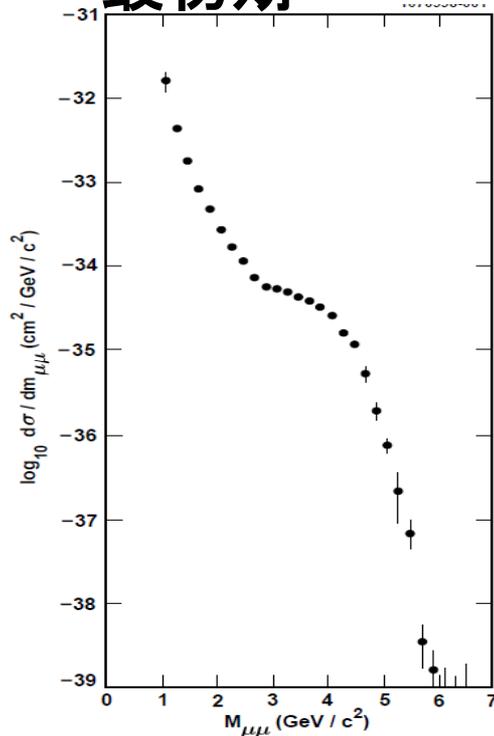


SeaQuest  
/Fermilab



# Dimuon 不変質量分布

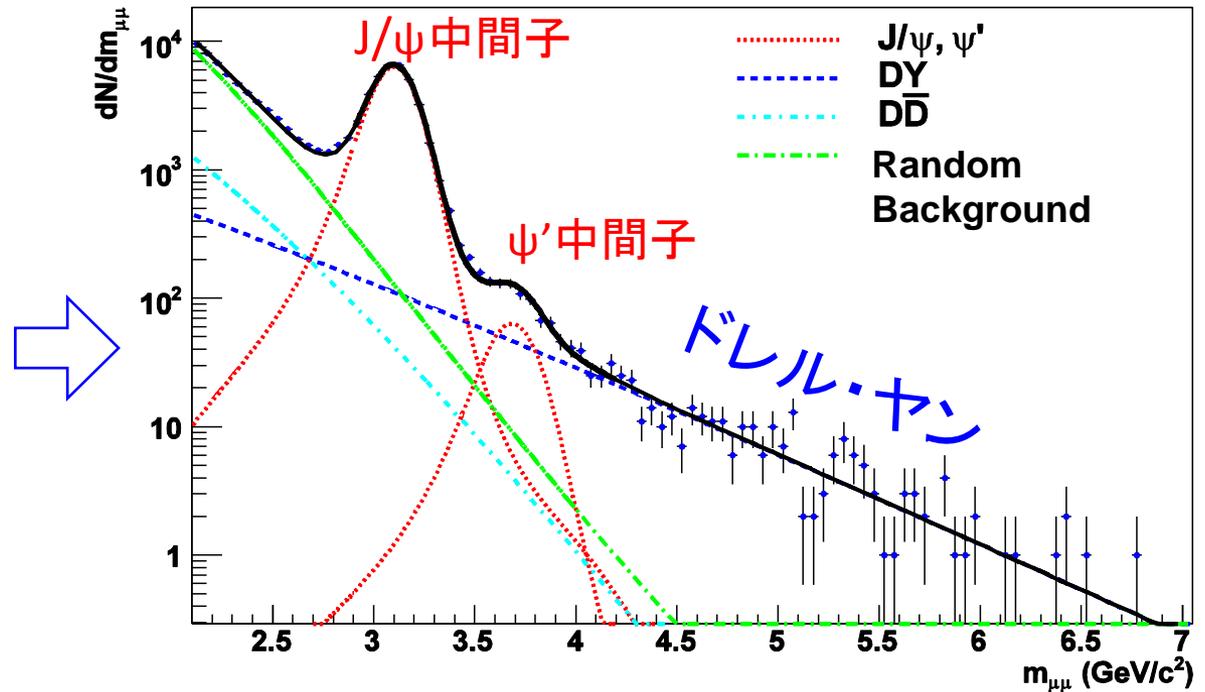
最初期



proton-Uranium collisions  
at AGS.

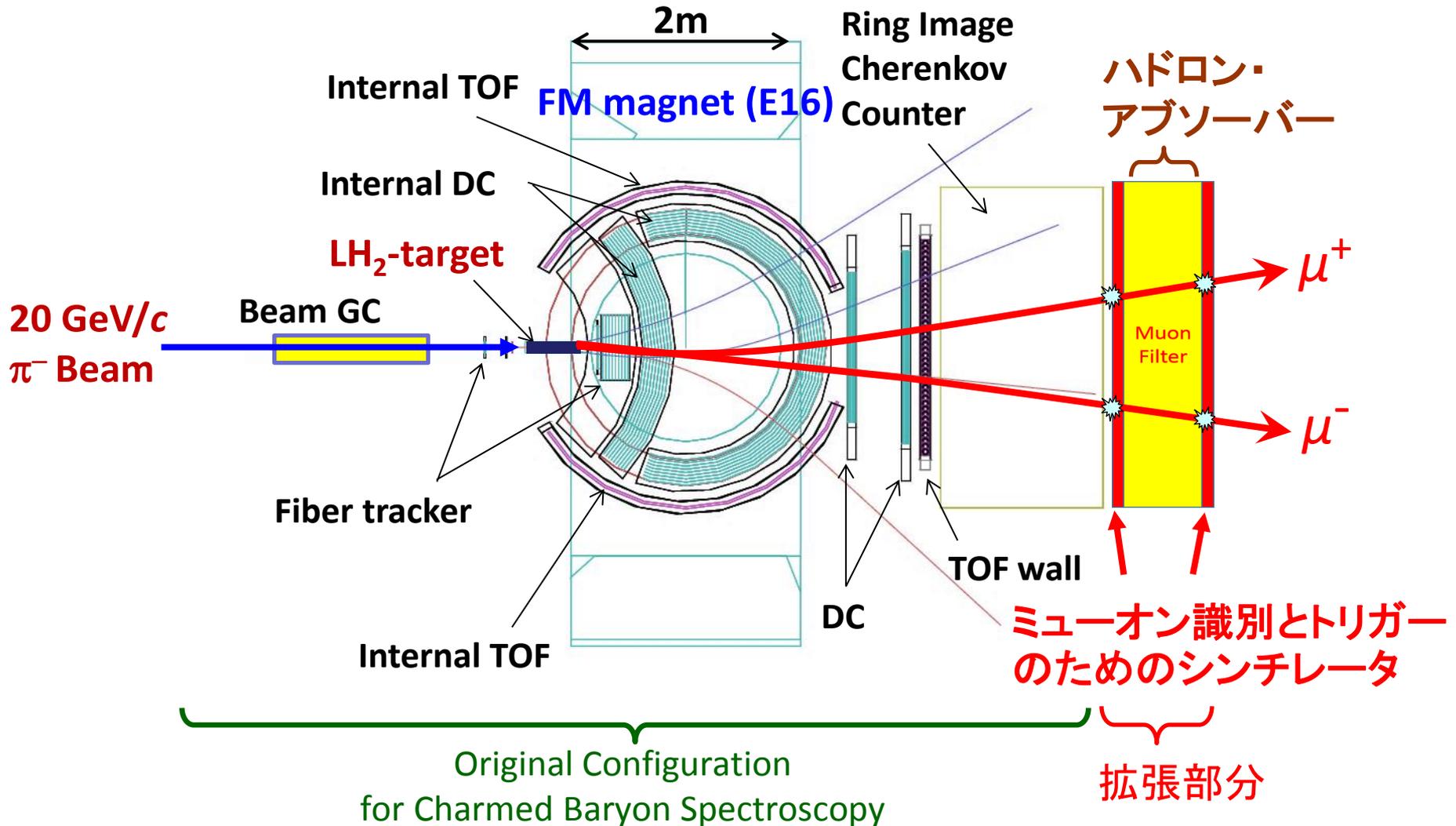
J.H. Christenson et al., PRL  
25 (1970) 1523

(わりと)最近



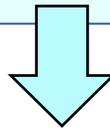
Indium-Indium collisions at 158 GeV/nucleon  
NA60, PRL 99 (2007) 132302

# ドレル・ヤン ( $\pi^- p \rightarrow \mu^+ \mu^- X$ ) 測定のための J-PARC E50 実験の拡張プラン



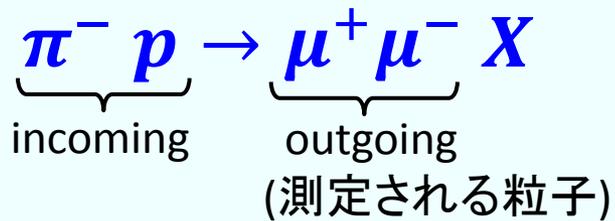
### 特徴

- ・ (比較的) 低いビーム・エネルギー  
→ エクスクルーシヴDY過程の生成断面積が高い
- ・ 前方領域における ミューオン識別・運動量測定  
→ エクスクルーシヴDY過程は前方生成が支配的
- ・ ハドロン・アブソーバーによる多重散乱の影響を受けない運動量測定  
→ エクスクルーシヴDY事象を、ミッシング・マス法により同定可能



エクスクルーシヴ(排他的)ドレル・ヤン過程( $\pi^- p \rightarrow \mu^+ \mu^- n$ )  
の測定に最適

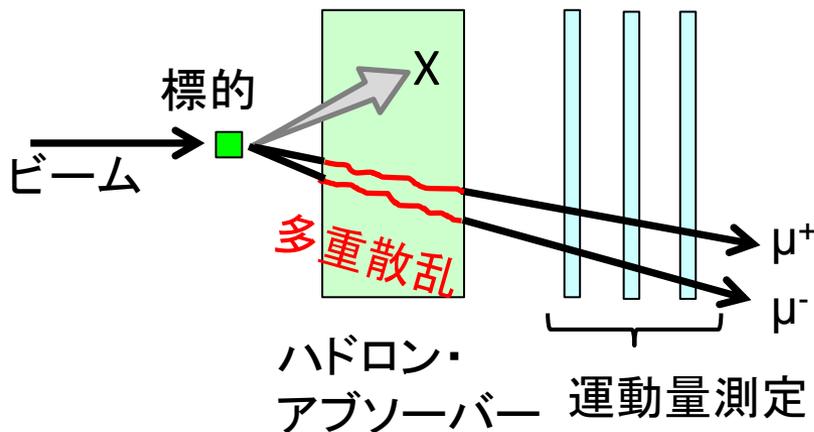
# Missing Mass 法を用いた 排他的ドレル・ヤン事象の同定



$$M_X^2 = \left( \sum E_{in} - \sum E_{out} \right)^2 - \left( \sum \mathbf{p}_{in} - \sum \mathbf{p}_{out} \right)^2$$

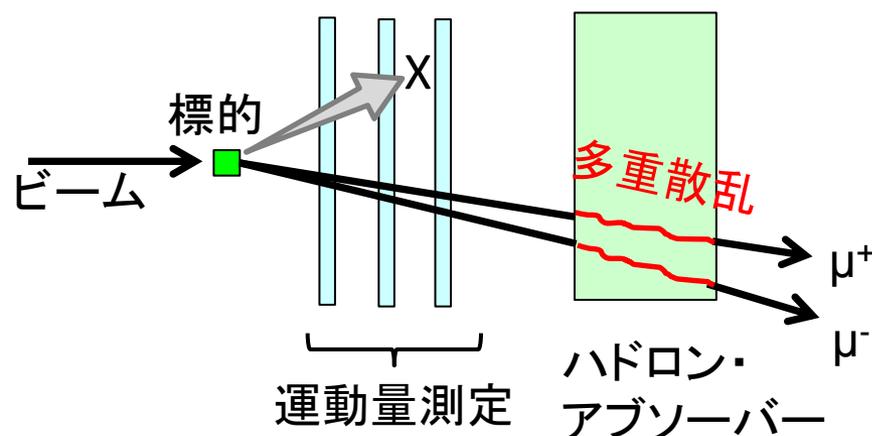
- ・ エクスルーシヴ (排他的) ドレル・ヤン過程  
 $M_X = M_n$  (0.9396 GeV/c<sup>2</sup>)
- ・ インクルーシヴ (包括的) ドレル・ヤン過程,  
 他のバックグラウンド事象  $M_X > M_n$

## 典型的なドレル・ヤン実験



質量分解能 ☹️

## 今回提案する ドレル・ヤン実験



質量分解能 ☺️

# 収量の見積もり

## Event Generator

- Inclusive Drell-Yan

*Pythia 6.4.26 + LHAPDF 5.8.9*

- Exclusive Drell-Yan

GPD:

*Pire 2001: EPJC 23, 675 (2002)*

*Kroll 2013: EPJC 73, 2278 (2013)*

*Kroll 2015: arXiv: 1506.04619*

- Background

*JAM 1.132*

## Particle Transportation

### + Detector Response

*Geant 4.9.3*

(E50 spectrometer + Muon ID)

## Total Cross Section

Inclusive Drell-Yan ( $M_{\mu\mu} > 1.5 \text{ GeV}$ )

	$\pi^-$	$\pi^+$
10 GeV	2.11 nb	0.323 nb
15 GeV	2.71 nb	0.493 nb
20 GeV	3.08 nb	0.616 nb

Exclusive Drell-Yan ( $M_{\mu\mu} > 1.5 \text{ GeV}$ ,  $|t-t_0| < 0.5 \text{ GeV}^2$ )

	$\pi^-$ (Pire 2001)	$\pi^-$ (Kroll 2013)	$\pi^-$ (Kroll 2015)
10 GeV	6.28 pb	17.53 pb	140 pb
15 GeV	4.66 pb	10.64 pb	20 pb
20 GeV	3.69 pb	7.24 pb	

Hadronic Background

	$\pi^-$	$\pi^+$
10 GeV	26.9 mb	24.8 mb
15 GeV	25.8 mb	24.1 mb
20 GeV	25.1 mb	23.5 mb

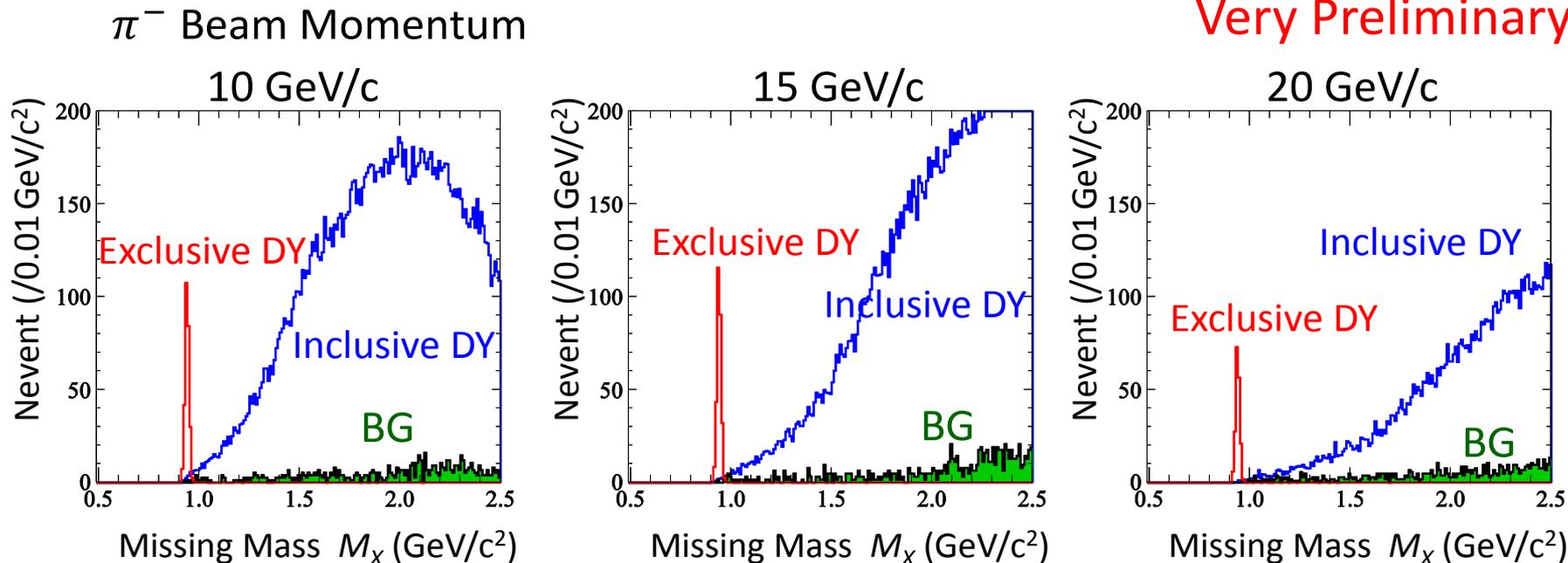
# シミュレーションに用いた実験条件

- **Target** : 57cm LH<sub>2</sub> ( $n_{TGT} = 4 \text{ g/cm}^2$ )
- $\epsilon(\text{DAQ*Tracking*PID}) = 0.9*0.7*0.9$
- **Beam momentum resolution**:  $\Delta p/p = 0.1 \%$
- **Detector resolution**:  $\Delta M/M = 1 \%$
- **Exclusive DY**:  $\sim 1.2 \text{ events/day/pb}$  for  $I_{\text{beam}} = 10^7 \pi^-/\text{sec}$
- $\pi^-$  beam momentum: 10/15/20 GeV/c
- **Data Taking Period**: 50 days

# 期待される Missing Mass $M_X$ 分布

データ取得期間を50日と仮定した場合

$1.5 < M_{\mu^+\mu^-} < 2.9 \text{ GeV}/c^2$   
Very Preliminary

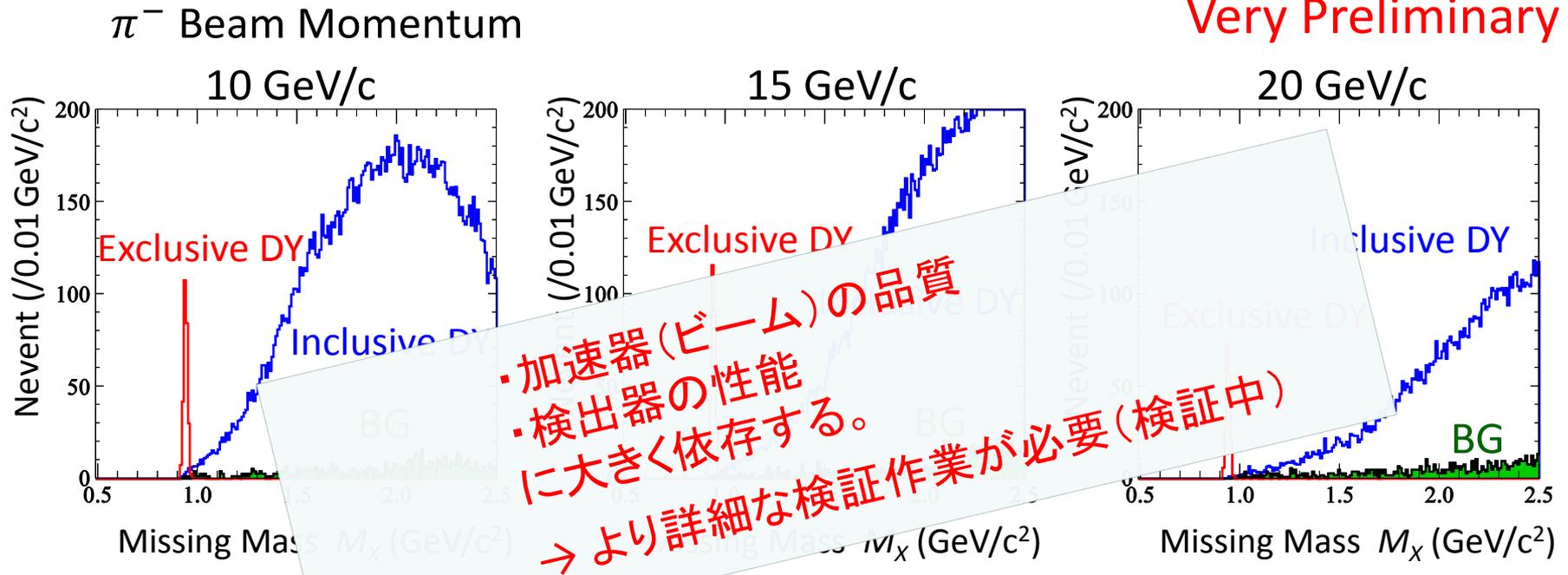


- The signal of exclusive Drell-Yan processes can be clearly identified in the missing mass spectrum of dimuon pairs.
- Because of the low event rate, this program could be accommodated into the E50 experiment.

# 期待される Missing Mass $M_X$ 分布

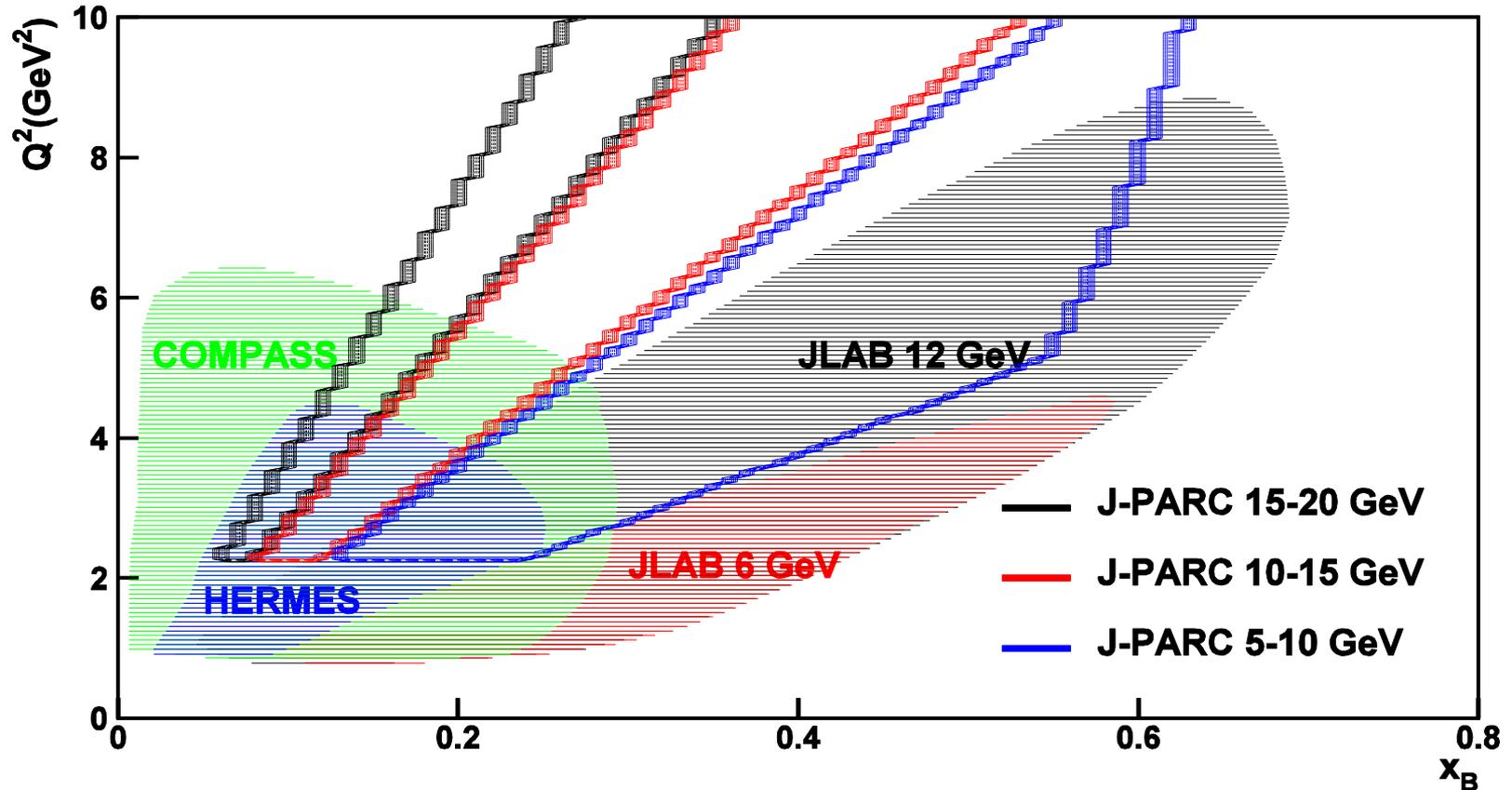
データ取得期間を50日と仮定した場合

$1.5 < M_{\mu^+\mu^-} < 2.9 \text{ GeV}/c^2$   
Very Preliminary



- The signal of exclusive Drell-Yan processes can be clearly identified in the missing mass spectrum of dimuon pairs.
- Because of the low event rate, this program could be accommodated into the E50 experiment.

# GPD( $x_B, t; Q^2$ ) from space-like and time-like processes



- J-PARC: **Time-like** approach and **large- $Q^2$**  region.

# まとめ

- J-PARC はハード・エクスクルーシヴ過程を研究するのに適している。
- J-PARC にて、パイ中間子ビームによる エクスクルーシヴ ドレル・ヤン事象を測定することにより
  - **大きい $Q^2$  領域での GPD**
  - **GPDの普遍性(空間的過程 $\leftrightarrow$ 時間的過程)の検証**
  - **GPD の QCD-evolution についての検証**
  - **エクスクルーシヴ(排他的) DY 過程 の因子化 の検証**が可能である。
- 本実験は、J-PARC E-50 実験の仕様を一部変更することにより実現可能であることが見込まれる。